

III.1 Kwilu-Ngongo : Formulation des matériaux de construction à base de terre et de résidus de canne à sucre

III.1.1 Introduction

Du 19 au 24 août et du 18 au 29 septembre 2017 un séjour a été effectué dans la région de Kwilu Ngongo, dans la province du Kongo Central, à l'ouest de la Rép. Dém. du Congo.

Ce séjour s'inscrivait dans un projet plus large qui visait à valoriser les gisements argileux de la région du Kongo Central (R.D.Congo) et à améliorer les matériaux de construction à base de terre.

Ce séjour visait un double objectif :

(1) **Contribuer à la connaissance des terres de la région de Kwilu Ngongo** : en décembre 2016, s'est installée à l'est de la cité de Kwilu Ngongo une briqueterie (la Briqueterie de Kwilu Ngongo). Cette dernière extrait de la terre de la région pour ses briques. Il a donc été question de caractériser ces terres en vue de promouvoir leur meilleure utilisation. Pour ce faire, des travaux de prospection et de cartographie ont été menés dans la concession et aux alentours. Un total de 20 échantillons a été prélevé. Ces derniers ont été caractérisés en laboratoire en termes de leur potentiel d'utilisation.

(2) **Mettre en place une formulation de matériaux en terre crue** : la briqueterie voudrait diversifier ses produits en proposant une brique crue pour les populations locales. Il a donc été question de réfléchir sur un produit capable de satisfaire à cette demande. Nous avons décidé d'utiliser des résidus de canne à sucre, largement disponibles, et de les ajouter à la terre comme stabilisant. Ces résidus sont de deux types :

- La bagasse de canne à sucre : il s'agit d'un produit issu du broyage de la canne à sucre lors de l'extraction du jus (Fig. II.4). Cette bagasse provient de la sucrière de Kwilu Ngongo, située 300 mètres à l'ouest de la briqueterie.



Fig. II.4. Tas de bagasse.

- La cendre de bagasse : pour produire ses briques, la briqueterie utilise comme combustible dans le four, la bagasse de canne à sucre séchée. Cette bagasse n'est pas totalement

consommée, et, à la sortie du four, elle fournit une cendre siliceuse (Fig. II.5). Cette cendre peut être utilisée comme pouzzolane¹ favorisant la durabilité et la résistance de la terre.



Fig. II.5. Cendre de bagasse à la sortie du four.

Ces résidus de canne à sucre sont ajoutés à la terre pour faire des Blocs de Terre Comprimée (BTC) qui sont caractérisés par les propriétés mécanique (résistance à la compression) et hygrothermique (essais de durabilité). Les essais de durabilité ont consisté à évaluer les aptitudes du matériau à résister à l'action de l'eau. Ils se font par l'essai de vieillissement.

III.1.2 Origine des terres de la région de Kwilu Ngongo

Les terres de la région de Kwilu Ngongo sont des terres résiduelles formées par altération *in situ* des roches du Sous-groupe Schisto calcaire. Il est difficile de déterminer avec précision la nature des roches mères à l'origine des différentes terres ainsi que leur succession et répartition lithostratigraphique étant donné la rareté d'affleurements dans la région. Dans la région de Kwilu Ngongo le Sous-groupe Schisto calcaire est représenté par l'Unité de Lukunga (CII) ou Formation C4. Cette dernière est constituée pour l'essentiel de roches calcaires, mais également de couches de grès, de grès argileux, de calcaire argileux souvent dolomitique, d'argilites et de calcaires gréseux.

L'altération des horizons calcaires et argilo-calcaires donne une terre jaune, avec ou sans résidus de graviers et blocs calcaires selon le degré d'altération (Fig. II.6). L'altération des niveaux gréseux donne une terre mauve pâle violacée (Fig. II.7). L'altération des horizons gréseux argilo-calcaires et calcaires gréseux donne une terre rougeâtre ou jaunâtre à tâches rouges avec ou sans graviers de grès et de calcaire selon le degré d'altération (Fig. II.8). Dans la région de Kwilu Ngongo on observe essentiellement les terres jaunes avec ou sans résidus de graviers ou blocs de calcaire sur les sommets des crêtes, et la terre à tâches rouges dans les dépressions. Ces dernières constituent l'essentiel des terres présentes dans la concession de la briqueterie de Kwilu Ngongo.

¹ - Les pouzzolanes sont des matériaux n'ayant aucune capacité propre de liant mais pouvant réagir avec de la chaux hydratée Ca(OH)_2 en présence d'eau à température ambiante afin de former des composants du ciment. Ce pouvoir est appelé « activité pouzzolanique ».

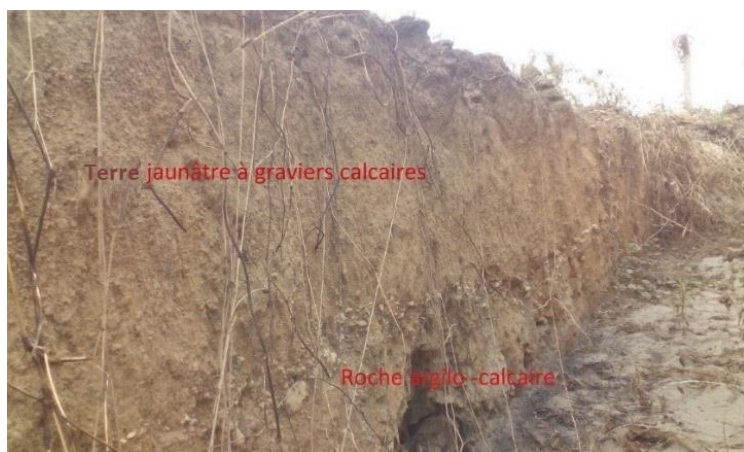


Fig. II.6. Aspect des résidus d'altération du calcaire argileux.



Fig. II.7. Argile mauve pâle violacé. Il s'agirait d'un produit d'altération d'un calcaire argileux rougeâtre avec des lits d'argilites.



Fig. II.8. Aspect de la roche mère (à gauche). Il s'agit de blocs de grès dans une matrice argilo- calcaire. Aspect de la terre (à droite). Il s'agit de la terre en majorité présente dans la concession. L'altération de la matrice argilo-calcaire donne cette couleur blanchâtre. L'altération des blocs de grès rouge donne cette couleur rougeâtre.

Afin de comparer les terres présentes dans la concession de la briqueterie, et les terres présentes sur les collines avoisinantes des observations et échantillonnages ont été effectués dans la cité de Kwilu Ngongo (voir ci-dessous).

III.1.3 Caractéristiques du gisement

a) Géomorphologie

Le gisement exploré est une concession que la sucrière de Kwilu Ngongo a cédée à la briqueterie de Kwilu Ngongo. Il s'agit pour l'essentiel de champs de canne à sucre encore en culture ou abandonnés. Sur le plan géomorphologique, la concession est caractérisée par un relief fait de crêtes, dont l'altitude maximale mesurée est de 380 mètres, et de dépressions dont l'altitude minimale mesurée est de 355 mètres (Fig. II.9). Cette géomorphologie est observée dans les différentes parcelles de canne à sucre de la région de Kwilu Ngongo. La concession de Kwilu Brique est délimitée à l'ouest par la rivière Kwilu et traversée d'ouest à l'Est par la rivière Ngongo, affluent du Kwilu (Fig. II.10).



Fig. II.9. Photographie montrant l'allure générale des parcelles de canne à sucre.

b) Cartographie du sous-sol

La cartographie du sol et du sous-sol a été faite sur base de puits présents dans la concession et en dehors et sur base des observations de terrain (Fig. II.10). Un puit a été creusé à l'aide d'une excavatrice, un autre puit est situé à l'endroit où s'effectuent des travaux de construction d'un canal. Ces puits se sont ajoutés à deux autres « puits » qui sont déjà présents dans la concession. Ces 2 derniers puits sont en réalité des zones d'extraction d'où ont été extraites par la briqueterie les premières terres. La figure II.11 représente la carte du sous-sol de la concession de la Briqueterie de Kwilu Ngongo ainsi que les coupes géologiques à travers la concession.

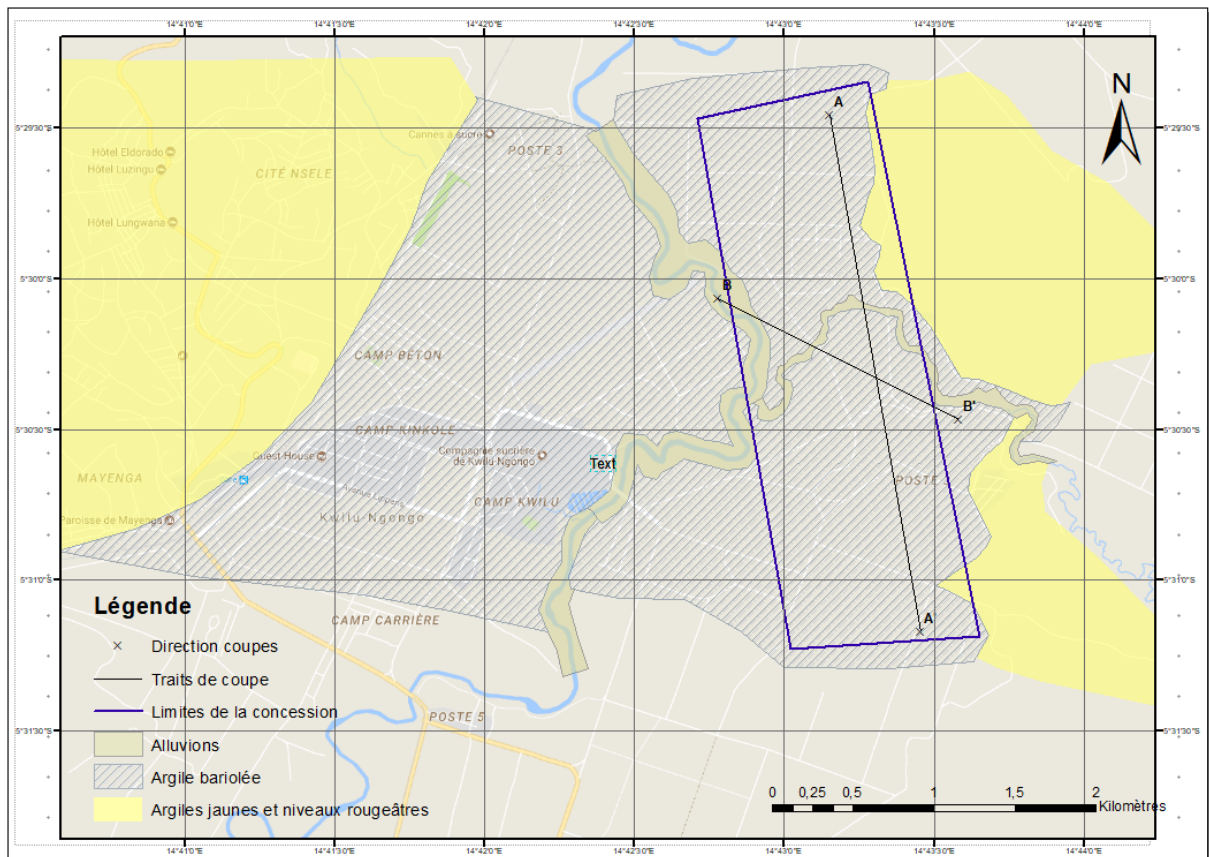


Fig. II.10. Carte de couverture de la région de Kwilu Ngongo.

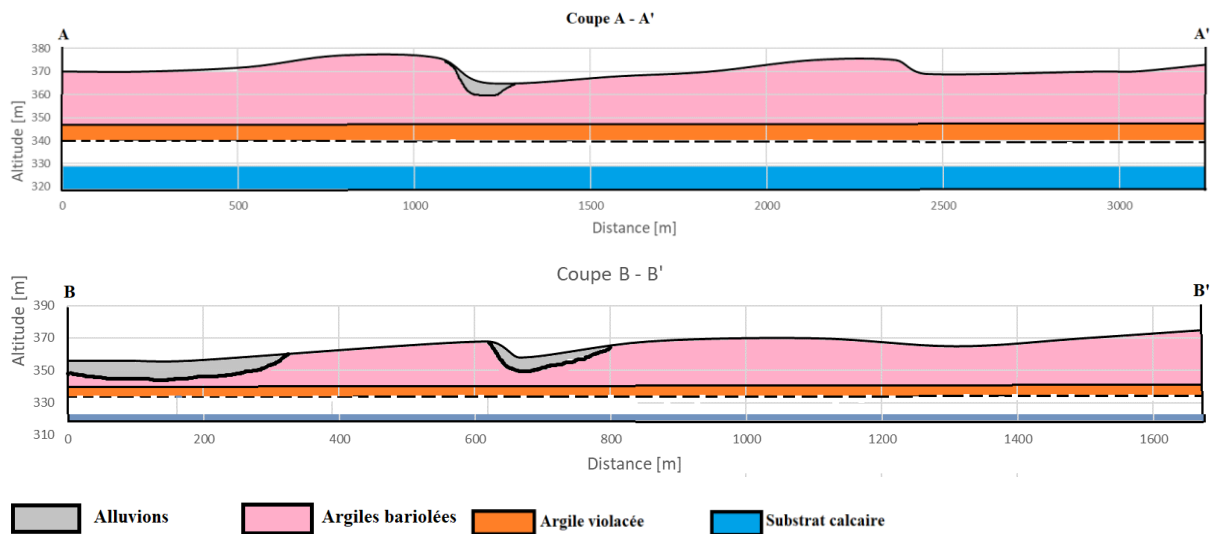


Fig. II.11. Coupes géologiques à travers la concession.

III.1.4 Propriétés des argiles de la région de Kwilu Ngongo

Afin de comprendre l'origine et les propriétés des matériaux de la concession de Kwilu Brique, un total de 18 échantillons a été prélevé dans la concession et en dehors sur un total de 9 sites.

Chaque échantillon a été caractérisé par :

- Analyse minéralogique par DRX
- Détermination des limites d'Atterberg
- Analyse granulométrique par laser
- Détermination de la perte au feu (chauffage à 550°C).

Quatre échantillons ont été caractérisés par fluorescence X.

a) Description des sites de prélèvement

Site A : Parcelle 404

Coordonnées géographiques : 5°31'3,6''S 14°43'19,7''E @ 370 m.

Description : Il s'agit d'une zone d'extraction de la briqueterie. La zone est située sur une parcelle de la sucrière (parcelle 404 selon la dénomination de la sucrière), et dans la concession de la briqueterie.

Facies : La figure II.12 montre les différents facies observés sur ce site. Du haut vers le bas nous avons :

- une couche d'humus d'environ 1 mètre d'épaisseur (couche non échantillonnée)
- une couche argileuse blanchâtre communément surnommée « agile blanche », dont l'épaisseur est plus importante au milieu de la dépression (zone plus basse) et diminue vers les sommets des petites collines avoisinantes : **échantillon A**. Cette coloration blanche observée dans les premiers mètres est due au fait que la parcelle est située au pied d'une pente, une zone où s'accumulent les eaux des précipitations et de ruissellement formant une sorte de « marécage ». Ce qui crée un lessivage donnant une coloration blanchâtre. Nous remarquons donc que cette coloration ne se prolonge pas en profondeur. Dans cette couche on retrouve quelques débris de végétaux en décomposition, qui proviennent des champs avoisinants par érosion.
- une couche argileuse jaunâtre. Il s'agit probablement de la couche lessivée : **échantillon B**. Cette coloration jaunâtre est observée dans la couche sous-jacente.
- une couche argileuse colorée en rouge avec des tâches blanchâtres et jaunâtres, avec des résidus de roche calcaire et gréseuse de diamètre millimétrique et centimétrique : **échantillon C**.
- une couche argileuse mauve violacé avec des horizons argileux d'épaisseur centimétrique jaune foncé : **échantillon D**.



Fig. II.12. Facies observés à la parcelle 406. A : « argile blanche ». B. niveau jaunâtre, C. niveau à tâches rouges. Les cercles rouges montrent des niveaux qui contiennent des résidus de roches calcaires.

Site B : Parcelle 406

Coordonnées géographiques : 5°30'12,8''S 14°43'4,5''E @ 368 m.

Description : Il s'agit d'une zone d'extraction de la briqueterie. La zone est située sur une parcelle de la sucrière (parcelle 406 selon la dénomination de la sucrière), et dans la concession de la briqueterie.

Facies : La figure II.13 montre les différents facies observés sur ce site. Du haut vers le bas nous avons :

- une couche de graviers probablement de remblai d'environ 50 cm d'épaisseur.
- une couche humifère d'environ 60 cm d'épaisseur (non échantillonné). La proximité du site de la rivière Kwilu expliquerait la texture sableuse de cet humus. Ce niveau serait « contaminé » par les alluvions de la rivière Kwilu. Ces alluvions sont principalement constituées de sables et argiles déposés lors des périodes de crue de la rivière.
- une couche argileuse brune avec des taches rougeâtres et blanchâtres : **échantillon E**. Ces colorations s'intensifient avec la profondeur (avec la diminution du degré d'altération).
- une couche argileuse avec des taches rougeâtres et blanchâtres : **échantillon F**.

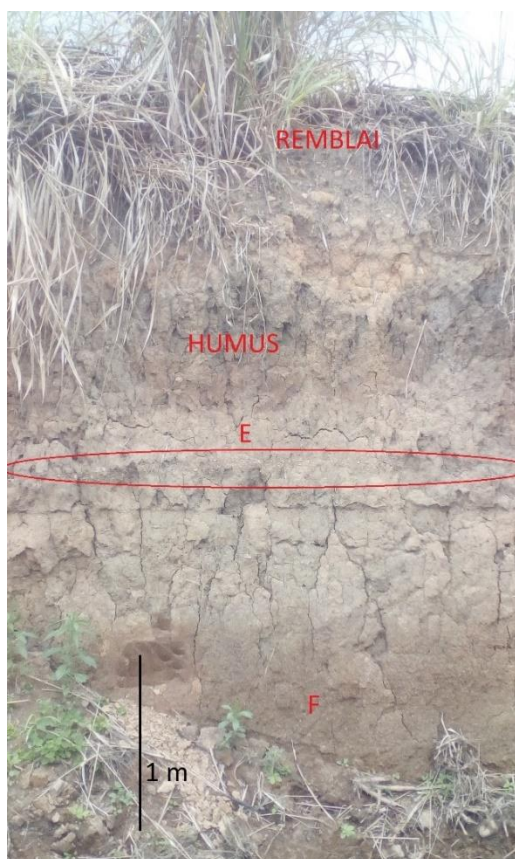


Fig. II.13. Profil du site B. Le cercle rouge indique un niveau de graviers dont le diamètre maximal est de 3 cm.

Site C : Parcelle 407

Coordonnées géographiques : 5°30'28,9''S 14°43'14,4''E @ 370 m.

Description : La zone est située sur une parcelle de la sucrière (parcelle 407 selon la dénomination de la sucrière), et dans la concession de la briqueterie.

Facies : il s'agit d'un seul niveau argileux observé sur une épaisseur supérieure à 5,5 mètres, sur le flanc d'une petite colline de 4 m de haut. Un puit de 1,5 m a été creusé. Le niveau observé sur le flanc de la colline se prolonge en profondeur dans le puit creusé. Il s'agit d'une couche argileuse à tâches rougeâtres et blanchâtres, et des tâches jaunâtres (Fig. II.14). Un seul échantillon a été prélevé sur ce site : **échantillon G**.



Fig. II.14. Site d'échantillonnage C.

Site D : Poste 4A

Description : La zone est située en dehors des parcelles de la sucrière. Il s'agit d'une petite colline proche d'une décharge de la sucrière.

Facies : Il s'agit d'une couche argileuse mauve pâle violacé avec des lits argileux d'épaisseur centimétrique jaunes : **échantillon I**. Ce niveau est surmonté d'un niveau jaune riche en graviers calcaires : **échantillon H** (Fig. II.15).



Fig. II.15. Site d'échantillonnage D.

Site E : Poste 4B

Description : La zone est située en dehors des parcelles de la sucrière. Il s'agit d'une zone où les habitants extraient de la terre pour une briqueterie artisanale (Fig. II.16).

Facies : il s'agit d'un niveau argileux brun jaunâtre : **échantillon J**.



Fig. II.16. Site d'échantillonnage E.

Site F : Parcelle 507

Coordonnées géographiques : 5°30'35,3''S 14°41'52,1''E @ 379 m.

Description : Il s'agit d'une zone sur laquelle sont faits des travaux d'excavation. La zone est située tout le long d'une parcelle de la sucrière (parcelle 507 selon la dénomination de la sucrière), en dehors de la concession de la briqueterie.

Facies : La figure II.17 montre les différents facies observés sur ce site. Du haut vers le bas nous avons :

- une couche d'humus d'environ 60 cm d'épaisseur (couche non échantillonnée)
- une couche argileuse brun jaunâtre. Il s'agit de la couche lessivée : **échantillon K**
- une couche argileuse à tâches rouges et blanchâtres avec des résidus de roches calcaires et gréseuses : **échantillon L**.

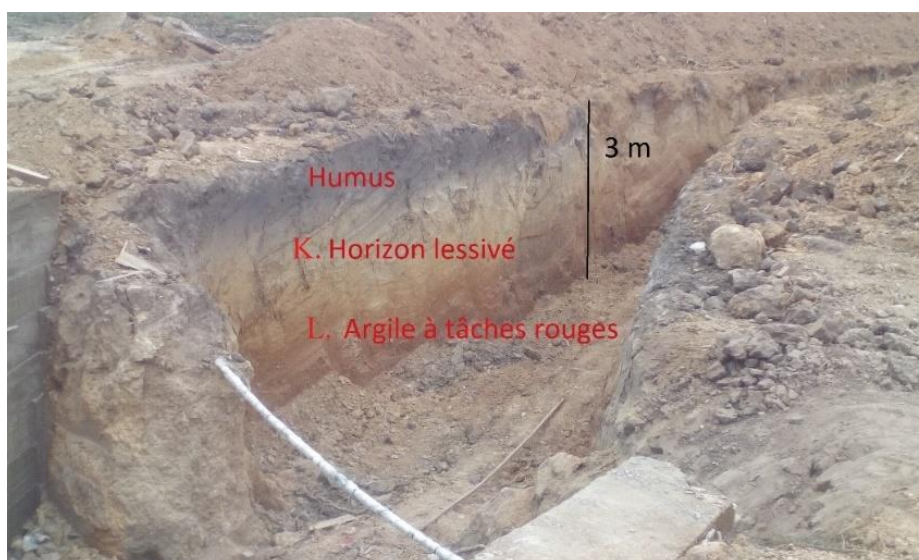


Fig. II.17. Facies observé au site F.

Site G : Camp béton

Coordonnées géographiques : 5°30'4,4''S 14°41'27,3''E @ 402 m.

Description : La zone est située en dehors des parcelles de la sucrière. Il s'agit d'une colline où les habitants extraient de la terre pour une briqueterie artisanale (Fig. II.18).

Facies : Terre jaune : **échantillon M**.



Fig. II.18. Site d'échantillonnage G.

Site H : Camp Hôpital

Coordonnées géographiques : 5°30'11,5''S 14°41'17,0''E @ 358 m.

Description : La zone est située en dehors des parcelles de la sucrière. Il s'agit d'une colline où les habitants extraient de la terre pour une briqueterie artisanale.

*Facies : niveau argileux mauve pâle violacé (**échantillon N**) avec un niveau argileux jaune foncé d'épaisseur décimétrique à la base (**échantillon O**) et un niveau de concentration de fer sous forme de nodules¹ au sommet (non échantillonné) (Fig.II.19).*



Fig. II.19. Site d'échantillonnage H. Le trait continu rouge délimite le niveau graveleux. Le cercle rouge montre le niveau jaune foncé. Les lettres désignent la dénomination des échantillons prélevés.

¹ Il s'agit d'un niveau de concrétion ferrugineuse sous forme de nodules. Ces derniers seraient soit formés en milieu anoxique durant la diagenèse, soit formés en milieu oxydant durant la pédogenèse. Il serait intéressant de s'intéresser à la valorisation de ces nodules. Ils sont utilisés dans la région comme remblai.



Site I : Parcelle 709

Description : La zone est située sur une parcelle de la sucrière (parcelle 709 selon la dénomination de la sucrière), et dans la concession de la briqueterie.

Facies : 3 échantillons ont été prélevés dans cette parcelle (**échantillons P, Q et R**). Ces échantillons ont été prélevés dans des puits d'environ 50 cm creusés manuellement.

III.1.5 Propriétés des échantillons

Les propriétés des différents échantillons sont reprises au Tableau II.2.

Propriétés	Unité	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
Perte au feu	%	6,0	8,6	10,1	13,3	6,4	8,9	6,3	7,3	7,5	8,0	6,9		9,2	5,4	7,9	3,8	5,8	8,4
Limite d'Atterberg	%																		
Liquidité		32,9	45,1	44,1	37,0	30,5	31,4	34,4	40	39,1	44,1	36,0	30,4	37,4	41,2	40,7	24,8	17,3	
Plasticité		22,0	36,5	34,0	28,6	22,9	25,1	26,1	28,3	29,2	34,0	21,0	21,7	28,3	29,5	27,4	19,8	12,9	
Indice de plasticité		10,9	8,6	10,1	8,4	7,6	6,3	8,3	11,7	9,9	10,1	15,0	8,7	9,1	11,7	13,3	5,0	4,5	
<i>IP</i>																			
Granulométrie	%																		
< 2 µm		6,5	14,6	14,6	5,6	4,5	14,1	10,2	3,8	17,8	5,5	26,6	12,4	12,4	3,8	4,3	7,7	8,0	
< 63 µm		85,3	96,9	96,9	95,2	78,5	77,9	85,3	93,1	97,7	90,5	93,4	93,1	84,3	93,1	95,4	76,8	64,2	
< 100 µm		96,6	100	100	100	88,3	88,6	94,2	99,9	100	99,8	95,9	98,6	98,4	99,9	100	91,9	83,5	
< 250 µm		100				95,0	98,7	97,0	100		100	100	99,8	100	100		95,8	99,6	
< 500 µm						98,6	99,9	98,8					100				99,6	100	
< 1 mm						100	100	100									100		
Minéralogie	%																		
Quartz		65	34	21	30	16	41	53	39	32	41	59	41	37	45	63	52	60	41
Plagioclase		< 1	/	2	1	/	1	<1	/	1	/	1	<1	/	<1	/	<1	<1	<1
Orthose		2	3	/	3	7	3	2	2	2	2	5	1	1	2	/	1	2	1
Goethite		/	8	24	10	26	13	7	14	9	16	7	16	22	8	13	8	4	16
Hématite		/	3	/	2	1	/	/	1	3	1	/	/	1	4	/	<1	/	/
Magnétite		/	/	/	3	6	/	2	3	/	/	2	/	/	/	/	2	2	/
Anatase		/	3	/	/	2	/	1	1	/	/	/	/	/	/	/	1	/	/
Minéraux argileux		32	49	53	51	42	43	35	40	53	40	26	42	39	41	25	35	32	42
<i>Illite</i>		2	22	4	4	16	2	12	11	8	35	7	6	7	20	36	16	4	6
<i>Chlorite</i>		/	1	/	/	/	1	/	1	1	/	/	/	2	1	2	1	1	/
<i>Kaolinite</i>		98	77	96	96	84	97	88	88	91	65	93	94	91	79	62	83	95	94
Chimie																			
<i>SiO₂</i>								69,18						57,61	66,60	61,54			
<i>TiO₂</i>								1,30						1,07	1,20	0,84			
<i>Al₂O₃</i>								17,50						19,89	14,97	19,30			
<i>Fe₂O₃</i>								3,54						10,61	8,79	9,20			
<i>MnO</i>								0,00						0,01	0,06	0,03			
<i>MgO</i>								0,01						0,00	0,03	0,00			
<i>CaO</i>								0,07						0,11	0,06	0,13			
<i>Na₂O</i>								0,00						0,00	0,00	0,00			
<i>K₂O</i>								0,59						0,30	0,66	0,22			
<i>P₂O₅</i>								0,05						0,07	0,06	0,03			
<i>LOI</i>								7,75						10,33	7,56	8,71			

Tableau II.2. Propriétés des échantillons prélevés à Kwilu Ngongo.

III.1.6 Formulations

a) Formulation en terre – bagasse

Les propriétés de la terre utilisée sont présentées au Tableau II.3.

Propriétés	Unité	Terre site B
Perte au feu	%	6,3
Limite d'Atterberg	%	
Liquidité		29,1
Plasticité		20,9
Indice de plasticité <i>IP</i>		8,2
Granulométrie (laser)	%	
< 2 µm (Argile)		6,2
< 63 µm (Limon)		63,8
< 100 µm (sable très fin)		84,8
< 250 µm (sable fin)		97,6
< 500 µm (sable moyen)		99,5
< 1 mm (sable grossier)		100
Minéralogie	%	
Quartz		55
Plagioclase		1
Orthose		11
Goethite		8
Minéraux argileux		25
<i>Illite</i>		8
<i>Chlorite</i>		/
<i>Kaolinite</i>		92

Tableau II.3. Propriétés de la terre utilisée pour la formulation en terre – bagasse.

La bagasse de canne à sucre a été utilisée dans la stabilisation des échantillons de Kwilu Ngongo. La canne à sucre est une graminée tropicale herbacée. La bagasse est le résidu fibreux de la canne à sucre obtenue après l'extraction du jus. La bagasse de la sucrière est utilisée comme combustible pour la production d'électricité, et les quantités excédentaires sont redistribuées à la briqueterie de Kwilu Ngongo qui l'utilise comme combustible pour cuire les briques. Malgré ces utilisations il reste un excédent de bagasse. Les fibres de bagasse sont employées dans cette étude afin de déterminer s'il est possible de les revaloriser dans une nouvelle perspective de diversification : la stabilisation des blocs de terre crue.

La composition moyenne de la bagasse est de 45% de fraction fibreuse, 2 ou 3% de solides non solubles (fractions inorganiques), 2 ou 3 % de solides solubles (molécules de saccharose résiduel, non extraites lors du procédé ainsi que d'une petite portion de cires) et 50 % d'eau (ICIDCA, 1990). La composition chimique de la matière fibreuse solide organique insoluble dans l'eau dépend des variétés de la canne à sucre. Elle est constituée de polymères : lignine (15 à 35 %), hémicellulose (25 à 35 %) et cellulose (30 à 50 %) (ICIDCA, 1990 ; Cuba9, 1990 ; Dinu, 2006 ; Berndt et Hodzic, 2007).

Les mélanges ont été réalisés selon différentes proportions présentées au Tableau II.4. Un mélangeur de type Hobart a permis d'homogénéiser le mélange.

Mélanges	Masse échantillon [gr]	Masse bagasse [gr]	Masse eau [gr]
I1	508,10	0 (0%)	102
I2	500	5 (1%)	105
I3	495,17	12,379 (2,5%)	107
I4	496	24,800 (5%)	114
I5	450	33,75 (7,5%)	120

Tableau II.4. Quantités mélangées pour la réalisation des éprouvettes terre – bagasse.

Les valeurs des résistances à la flexion (Rf) et à la compression (Rc) sont présentées au Tableau II.5.

Mélanges	Rf moyenne par échantillon	Rc moyenne par échantillon
I1	0,66	2,54
I2	0,84	2,80
I3	0,91	2,92
I4	0,93	2,95
I5	0,99	3,14

Tableau II.5. Résistances à la flexion et à la compression des éprouvettes terre – bagasse.

Nous avons effectué des tests de flexion et de compression sur des mélanges de terre et de bagasse. La terre a été mélangée avec 1%, 2,5%, 5% ou 7,5% en poids de bagasse. Les résistances à la flexion et à la compression augmentent avec l'ajout de bagasse. La résistance à la flexion passe de 0,66 MPa sans addition de bagasse à 0,99 MPa avec 7,5% de bagasse dans le mélange. La résistance à la compression augmente d'une valeur initiale de 2,54 MPa à 3,14 MPa avec l'ajout de bagasse. Les meilleurs résultats sont obtenus avec l'ajout de 7,5% de bagasse.

L'augmentation de la résistance à la compression avec l'ajout des fibres est souvent justifiée par la réduction de la taille des fissures de retrait (Ramaswamy et al., 1983 ; Ziegler et al., 1998 ; Filho et al., 2000). Les fibres limitent la formation des microfissures dues au retrait de séchage, et empêchent leur propagation (Vergas et al., 1986). Millogo et al. 2014 justifient l'augmentation de la résistance à la flexion avec l'ajout de fibre par la résistance à la traction élevée des fibres et leur adhérence à la matrice argileuse.

L'augmentation de la teneur en fibres au-delà d'une valeur optimale diminue la contrainte d'adhérence des fibres à la terre ; ce qui conduit à une diminution de la résistance à la compression (Khedari et al., 2005). Vergas et al. (1986) considèrent cette valeur à 8 % en poids. D'où dans notre étude la valeur maximale de fibre ajoutée a été fixée à 7,5 %.

b) Formulation terre – cendre de bagasse – chaux

Les propriétés de la terre utilisée sont présentées au Tableau II.6.

Propriétés	Unité	Terre Parcelle A
Perte au feu	%	10,6
Limite d'Atterberg	%	
Liquidité		42,0
Plasticité		32,3
Indice de plasticité <i>IP</i>		9,7
Granulométrie (laser)	%	
< 2 µm (Argile)		5,5
< 63 µm (Limon)		90,5
< 100 µm (sable très fin)		100
Minéralogie	%	
Quartz		24
Plagioclase		/
Orthose		2
Goethite		18
Hématite		1
Magnétite		3
Minéraux argileux		52
<i>Illite</i>		12
<i>Chlorite</i>		2
<i>Kaolinite</i>		84

Tableau II.6. Propriétés de la terre utilisée pour la formulation en terre – cendre de bagasse – chaux.

Dans cette étude, seule la chaux hydraulique a été utilisée. La vitesse globale de la réaction pouzzolanique dans les liants dépend de nombreux facteurs (Hewlett, 2004) : la quantité de pouzzolane dans le liant ; la quantité de SiO₂ dans la pouzzolane ; la nature des phases actives dans la pouzzolane ; la surface spécifique de la pouzzolane ; les propriétés physiques et chimiques de la chaux ; la durée de durcissement ; la température ; le rapport eau/solide.

D'une manière générale, la teneur en silice (SiO₂) augmente lorsque la température et/ou la durée de combustion augmente, et lorsque la perte au feu, liée à la quantité de carbone, diminue (Sabuni, 1995, Lima et al., 2012). Un changement de couleur est observé en fonction de la teneur en carbone (allant du noir vers le blanc, voir le rose pâle lorsqu'il n'y a plus la présence de carbone).

Une cendre pouzzolanique doit contenir de la silice amorphe (Feng et al., 2004). Durant la calcination, la cendre peut se cristalliser donnant des faibles propriétés pouzzolaniques. Plusieurs recherches ont montré que pour l'éviter, la température de combustion ne doit pas excéder 600°C (Ajay et al., n.d ; Basika et al., 2015). Nous avons effectué une représentation qualitative des phases amorphes et cristallines par DRX de la cendre calcinée (Fig. II.20). Le spectre a montré des raies correspondant aux distances inter-réticulaires du quartz, de la cristobalite, de l'hématite, de la mullite et du carbonate de potassium. On remarque que la cendre contient peu de silice amorphe (cristobalite) par rapport au silice cristallin (quartz). Ceci s'explique par la haute température atteinte dans le four lors de la calcination (plus de 600°C).

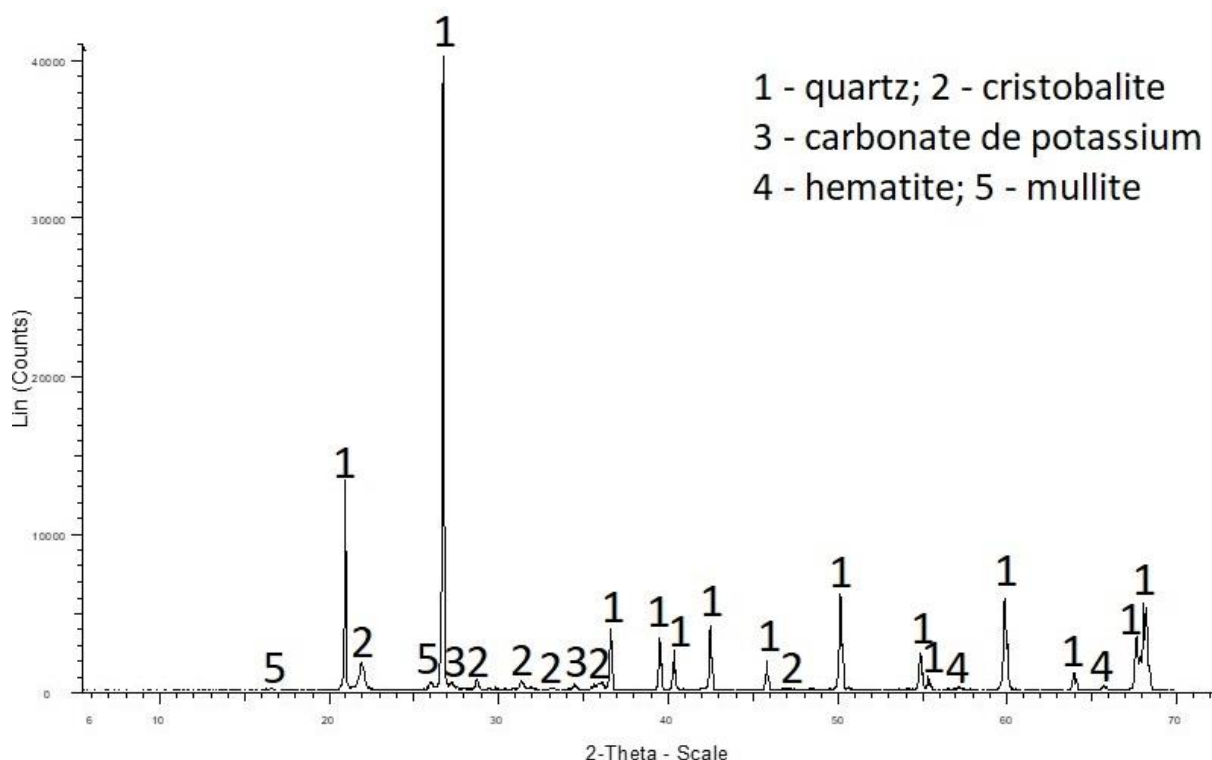


Fig. II.20. Diffractogramme de la cendre de bagasse.

La surface spécifique de la cendre influence sa réaction pouzzolanique avec la chaux. Elle est plus importante lorsque la surface spécifique augmente (Feng et al., 2004). La granulométrie de la cendre a été réalisée après un tamisage manuel (Tableau II.7).

Tamis (µm)	500	425	300	250	212	150	106	75	63	53
Refus cumulé (%)	5,8	11,2	26,9	35,3	46,4	60,6	77,4	89,1	95,1	97,6

Tableau II.7. Distribution granulométrique de la cendre de bagasse.

Hailu et Biruku (2012), recommandent que 50% de la cendre de bagasse à utiliser comme pouzzolane aie un diamètre inférieur à 40 µm. Nous remarquons que la cendre calcinée a une granulométrie très grossière, due au fait qu'à la sortie du four elle contient des débris des briques cuites.

Les mélanges ont été réalisés selon différentes proportions présentées au Tableau II.8. Un mélangeur de type Hobart a permis d'homogénéiser le mélange.

Mélange	Masse échantillon [gr]	Masse cendre [gr]	Masse chaux	Masse eau [gr]
II1	513	0 (0%)	0 (0%)	140
II2	505	30,3 (6%)	30,3 (6%)	151
II3	450	36 (8%)	36 (8%)	155
II4	450	54 (12%)	54 (12%)	135
II5	600	36 (6%)	0 (0%)	n.d
II6	600	0 (0%)	36 (6%)	n.d

Tableau II.8. Quantités mélangées pour la réalisation des éprouvettes terre – cendre de bagasse - chaux.

Les valeurs des résistances à la flexion (Rf) et à la compression (Rc) sont présentées au Tableau II.9.

Échantillons	Rf moyenne par échantillon	Rc moyenne par échantillon
II1	0,40	1,02
II2	0,44	1,67
II3	0,43	1,37
II4	0,47	1,48
II5	0,46	1,51
II6	0,79	2,30

Tableau II.9. Résistances à la flexion et à la compression des éprouvettes terre – bagasse.

L'ajout de la cendre de bagasse seule ou associée à la chaux n'augmente pas suffisamment la résistance du matériau. Ceci s'explique par le fait que la cendre obtenue contient peu de silice amorphe et a une granulométrie très grossière. Elle est donc peu pouzzolanique. Elle interagit alors comme un simple stabilisant physique en modifiant la taille des particules de l'échantillon. Cette cendre n'est donc pas un bon stabilisant.

La stabilisation à la chaux seule est une perspective intéressante pour cette terre, car elle augmente la résistance du matériau.

Un matériau ayant une résistance à la compression de 1,3 Mpa peut être utilisé en maçonnerie. La valeur souhaitée de la résistance à la flexion des briques de terre crue à utiliser en maçonnerie est de 0,4 Mpa (Jaime et al. 2012).